Les marées, notions de base

Pierre Causeret

C'est un phénomène que connaissent bien tous les habitants des côtes de l'Atlantique ou de la Manche. On peut observer en moyenne deux marées hautes (ou pleines mers) par jour et chaque mois deux périodes de marées plus importantes dites de vives-eaux ou grandes marées. Mais les explications ne sont pas si simples. Il suffit pour s'en convaincre de parcourir les sites ou les livres qui en parlent.

Les principales erreurs rencontrées

« Dès que la Lune se trouve près d'un océan, le niveau de l'eau monte, c'est la marée haute. Puis dès qu'elle s'éloigne, l'eau redescend, c'est la marée basse »[1]. Ce type d'explication correspond à la figure 1 ; il ne peut justifier qu'une seule marée haute par jour.

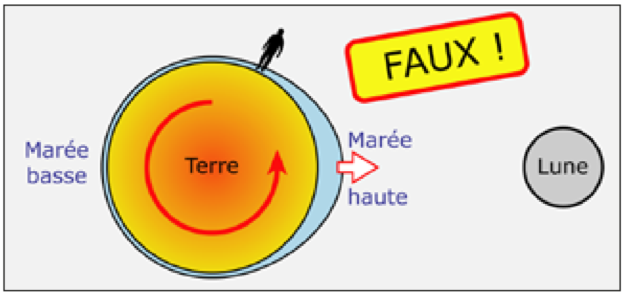


Fig.1. *Une explication fausse des marées assez répandue. Dans ce modèle, lorsque la Terre tourne sur elle-même, le personnage ne rencontre qu'une seule marée basse et une seule marée haute par jour.*

Pour trouver une deuxième marée haute dans la journée, certains vont chercher une deuxième explication, la force centrifuge. Une des marées hautes serait due à l'attraction de la Lune et l'autre à la force centrifuge. Ce type d'explication est confuse, les deux marées hautes provenant en réalité d'un même phénomène. Et c'est encore plus faux quand on attribue cette force centrifuge à la rotation de la Terre sur elle-même ou même à la révolution de la Terre autour du Soleil comme on peut le lire parfois.

L'exemple des étoiles doubles

Avant de parler des marées sur Terre, intéressons-nous aux forces de marée entre deux étoiles de taille comparable. On n'en a pas d'observation directe mais c'est sans doute le cas le plus simple à expliquer.

Imaginons deux étoiles E_1 et E_2 proches l'une de l'autre. On sait depuis Newton qu'elles s'attirent et que la force d'attraction est proportionnelle à leur masse et inversement proportionnelle au carré de la distance qui les sépare. Plus elles sont proches, plus elles s'attirent. Comme une étoile a une certaine dimension, toutes les parties de l'étoile E_1 ne sont pas à la même distance de l'étoile E_2. Les parties les plus proches sont davantage attirées que les parties plus éloignées (figure 2). Du coup, l'étoile E_1 va tomber sur l'étoile E_2 en se déformant, en s'allongeant du côté de A ainsi qu'à l'opposé.

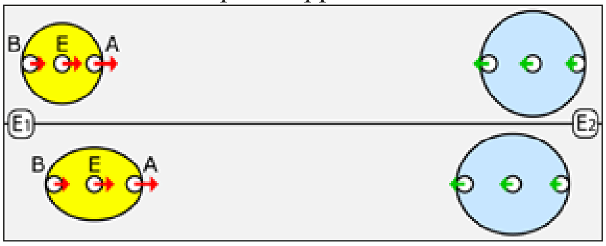


Fig.2. *Chute de l'étoile jaune sur l'étoile bleue. On a représenté en rouge les forces d'attraction. La partie A de l'étoile jaune étant plus proche de l'étoile bleue que la partie B, elle va tomber plus vite vers celle-ci et l'étoile va se déformer. De la même manière, l'étoile bleue va tomber sur l'étoile jaune en se déformant.*

On parle de force de marée ou d'attraction différentielle. Ce qui déforme l'étoile jaune, c'est la différence d'attraction entre les différentes parties de l'étoile en fonction de leur distance à l'étoile bleue.

Cette explication est tout à fait correcte et c'est la plus simple. Seul problème, elle ne va pas durer longtemps puisque les deux étoiles vont finir par se rencontrer et fusionner. Pour remédier à cette difficulté, il suffit de faire tourner les étoiles l'une autour de l'autre ou plus précisément autour de ce qu'on appelle leur centre de masse (figure 3).

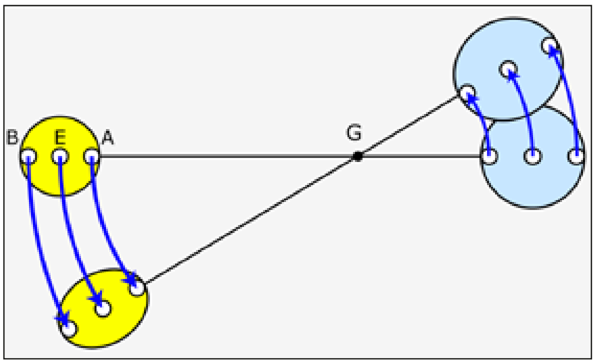


Fig.3. *Marées entre deux étoiles tournant autour de leur centre de masse G. La partie A de l'étoile jaune étant plus proche de l'étoile bleue que B, elle est davantage attirée et l'étoile jaune va s'allonger. L'étoile bleue se déforme aussi mais moins, l'étoile jaune étant moins massive que la bleue.*

Calcul de la force de marée

On appelle r le rayon de l'étoile jaune, d la distance entre les centres des deux étoiles, m_E la masse de l'étoile bleue et m la masse de la partie A ou B.

Distance du point A au centre de l'étoile bleue : d–r

Force d'attraction de cette étoile sur A : $F_A = G\dfrac{m \times m_E}{(d-r)^2}$

Distance du point B au centre de l'étoile bleue : d+r

Force d'attraction de cette étoile sur B : $F_B = G\dfrac{m \times m_E}{(d+r)^2}$

Force de marée : $F_A - F_B = G\dfrac{m \times m_E}{(d-r)^2} - G\dfrac{m \times m_E}{(d+r)^2}$

$$F_A - F_B = G \times m \times m_E \times \left(\frac{(d+r)^2 - (d-r)^2}{(d-r)^2(d+r)^2}\right)$$

$$F_A - F_B = G \times m \times m_E \times \left(\frac{4dr}{d^4 - 2d^2r^2 + r^4}\right)$$

Si r est petit devant d, ce qui est le cas habituellement, le dénominateur est approximativement égal à d^4.

On obtient alors :

$$F_A - F_B \approx G \times m \times m_E \times \left(\frac{4dr}{d^4}\right) \text{ soit } G \times m \times m_E \times \left(\frac{4r}{d^3}\right)$$

La force de marée de l'étoile bleue sur l'étoile jaune est donc proportionnelle au rayon de l'étoile jaune et inversement proportionnelle au cube de la distance entre les deux étoiles.

Le cas de la Terre et de la Lune

Les explications précédentes pour deux étoiles sont toujours valables dans le cas du système Terre-Lune. En effet, on dit parfois que la Lune tourne autour de la Terre mais il serait plus correct de dire que Terre et Lune tournent autour de leur centre de masse commun comme les deux étoiles de la figure 3. Mais le schéma est plus délicat à faire car le centre de masse du système se trouve à l'intérieur de la Terre à environ 1 700 km sous la surface.

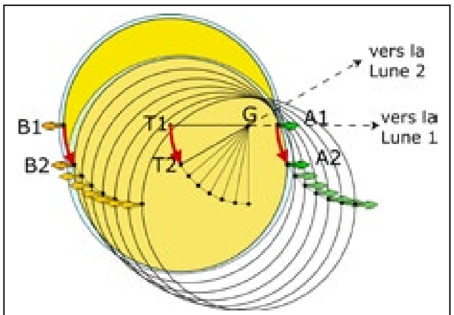


Fig.4. *G est le centre de masse du système Terre-Lune. A et B sont deux parties de la Terre situées l'une du côté de la Lune, l'autre à l'opposé.*

Sur la figure 4 nous supposons que la Terre ne tourne pas sur elle-même. En environ un mois, le centre T de la Terre décrit un cercle autour de G et tous les points de la Terre sont en translation circulaire. Au cours de ce mouvement, T passe de T1 à T2, le personnage de droite de A1 à A2 et le personnage de gauche de B1 à B2. Le point A étant plus proche de la Lune, il est davantage attiré que T et T est plus attiré que B qui est plus éloigné, ce qui va créer deux bourrelets de marée.

Si maintenant nous considérons la rotation de la Terre sur elle-même, on obtient bien deux marées hautes par jour (figure 5).

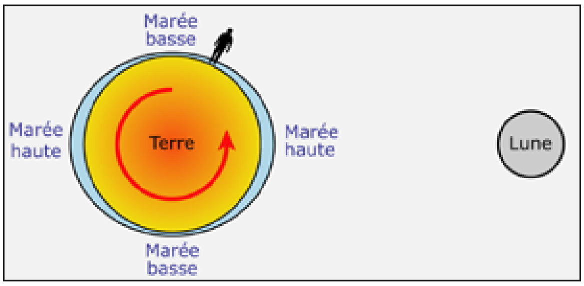


Fig.5. *On considère maintenant la rotation de la Terre sur elle-même. Les bourrelets de marée restent toujours ici (dans ce modèle simplifié) alignés avec la Lune. Le personnage va rencontrer deux marées basses et deux marées hautes par jour.*

On s'est placé dans un référentiel dit galiléen, fixe par rapport aux étoiles Mais il existe une autre manière d'aborder les marées sur Terre : de nombreux ouvrages se placent dans un référentiel géocentrique dont l'origine est le centre de la Terre et dont les axes pointent vers des étoiles fixes. Mais comme la Terre tourne autour du centre de masse du système Terre-Lune, nous ne sommes plus dans un repère galiléen. On voit alors apparaître des pseudo-forces ou forces d'inertie appelées forces centrifuges (et que n'aiment pas certains physiciens).

Dans un tel repère, le centre de la Terre est soumis d'une part à la force d'attraction de la Lune et d'autre part à la force centrifuge due au mouvement de la Terre autour du centre de masse du système Terre-Lune. Ces deux forces s'équilibrent. Comme on peut le voir sur la figure 4 (où l'on avait supprimé la rotation de la Terre sur elle-même), les points A et B sont soumis au même mouvement que T, ils subiront donc la même force centrifuge dans le référentiel géocentrique. Mais du côté de A, plus proche de la Lune que T, la force d'attraction de la Lune sera supérieure, donc plus importante que la force centrifuge alors que du côté de B, plus éloigné de la Lune, ce sera l'inverse (figure 6).

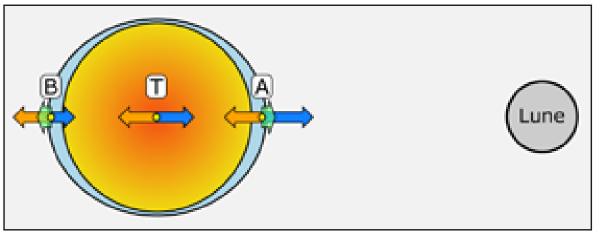


Fig.6. *Les marées dans un référentiel géocentrique. En orange, la pseudo-force centrifuge, identique en tout point de la Terre (nous faisons toujours abstraction de la rotation de la Terre sur elle-même). En bleu, la force d'attraction de la Lune sur différentes parties de la Terre. En vert, la résultante de ces deux forces.*

Dans cette approche géocentrique, la force de marée est toujours une force d'attraction différentielle (différence d'attraction entre A et T ou entre B et T).

Il est intéressant de rechercher cette force de marée en d'autres points de la surface de la Terre. Cette fois, il faut ajouter force d'attraction et force d'inertie centrifuge sous forme vectorielle.

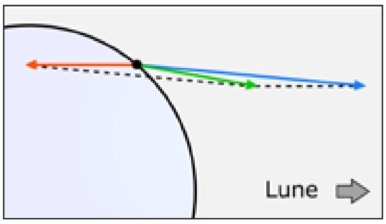


Fig.7. *Force de marée en un point. En bleu, la force d'attraction de la Lune, en orange, la force d'inertie centrifuge et en vert, la somme des deux vecteurs.*

Si on représente les forces de marée sur l'ensemble de la surface de la Terre, on obtient la figure 8.

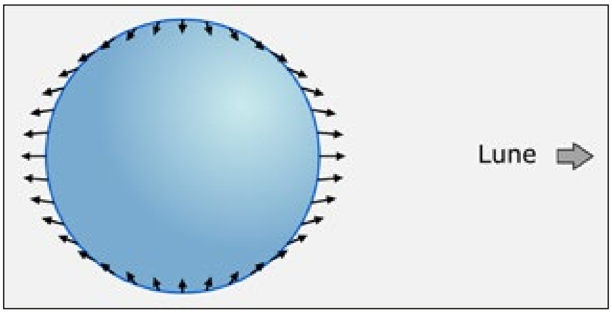


Fig.8. *Les forces de marée à la surface de la Terre.*

On remarque que la force de marée peut aussi avoir une composante horizontale. Celle-ci est particulièrement importante pour le déplacement des masses d'eau.

La période de la marée

La figure 5 nous montrait deux marées hautes en 24 h soit une période de 12 h. Or, ce n'est pas ce que l'on observe. La raison en est simple : pendant que la Terre effectue un tour sur elle-même, la Lune s'est déplacée sur son orbite. De ce fait, l'intervalle de temps moyen entre deux pleines mers est de 12 h 25 min (figure 9).

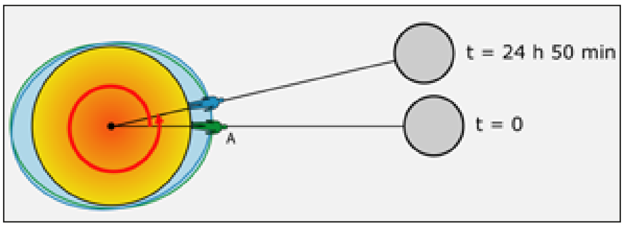


Fig.9. *Pour l'observateur en A, la marée est haute, il voit la Lune au méridien. Il faut attendre 24 h et 50 min pour que l'observateur retrouve la Lune au méridien, celle-ci s'étant déplacée d'environ 13° autour de la Terre. Comme il y a aussi une marée haute quand la Lune est à l'« antiméridien », cela donne un intervalle moyen de 12 h 25 min entre deux pleines mers.*

Calcul du décalage de 50 min par jour

Pendant que la Terre tourne sur elle-même, la Lune tourne autour de la Terre. On cherche après combien de temps on retrouve un passage de la Lune au méridien pour un habitant de la Terre. Il s'agit d'un problème de période synodique classique, composition de deux mouvements périodiques, que l'on peut résoudre simplement en calculant des vitesses angulaires.

Période sidérale de révolution de la Lune : 27,3216 jours.

Vitesse angulaire sidérale de la Lune autour de la Terre :

360° / 27,3216 j soit 13,2 °/j

Période sidérale de rotation de la Terre : 23 h 56 min soit 0,9972 jours

Vitesse angulaire sidérale de la Terre :

360° / 0,9972 j soit 361 °/j

On peut trouver la vitesse angulaire de rotation de la Terre par rapport à l'axe Terre - Lune en soustrayant les deux vitesses angulaires précédentes (les deux tournent dans le même sens) : 361 °/j – 13,2 °/j = 347,8 °/j.

Si un point de la surface terrestre se trouve sur l'axe Terre - Lune à un instant 0, il se retrouvera sur cet axe après avoir parcouru 360° toujours par rapport à cet axe.

347,8° en 1 jour → 360° en 360/347,8 j soit 1,035 j ou encore 1 jour et 50 minutes.

Le rôle du Soleil

La Terre est davantage attirée par le Soleil que par la Lune mais les forces de marées dues à la Lune sont 2,2 fois plus importantes que celles dues au Soleil, grâce à sa proximité (voir encadré). C'est bien la Lune le premier responsable des marées, le Soleil ayant néanmoins une influence non négligeable. On lit parfois que, sans la Lune, il n'y aurait pas de marées. C'est faux, il y aurait des marées mais moins importantes, uniquement dues au Soleil, comparables aux marées de mortes-eaux actuelles.

Qui attire le plus la Terre, le Soleil ou la Lune ?

En termes de force de gravitation, proportionnelle à la masse m et inversement proportionnelle au carré de la distance d, il faut comparer m/d² pour la Lune et pour le Soleil.

$m_S = 2\times10^{30}$ kg ; $m_L = 7{,}35\times10^{22}$ kg ;

$d_S = 149{,}6\times10^{6}$ km ; $d_L = 384\ 400$ km.

On obtient 180 fois plus pour le Soleil que pour la Lune : **la Terre est 180 fois plus attirée par le Soleil que par la Lune**.

En terme de force de marée, proportionnelle à la masse m et inversement proportionnelle au cube de la distance d, il faut comparer m/d³ pour la Lune et pour le Soleil.

On obtient 2,2 fois plus pour la Lune que pour le Soleil : **les forces de marées dues à la Lune sont 2,2 fois plus importantes que celles dues au Soleil**.

Les bourrelets de marées dues au Soleil vont se former sur l'axe Terre-Soleil. On peut comprendre que les forces de marées de la Lune et du Soleil vont s'ajouter quand Soleil Terre et Lune sont alignés donc en pleine Lune ou en nouvelle Lune. Ce sont les marées de vives-eaux ou grandes marées (figure 10a). À l'inverse, au premier ou au dernier quartier, les forces de marées dues au Soleil vont diminuer les marées dues à la Lune et donner les marées de mortes-eaux (figure 10b).

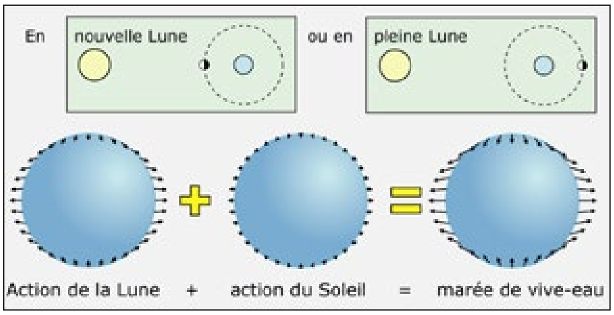


Fig.10a. *Quand Soleil, Terre et Lune sont alignés, les forces de marées dues à la Lune et au Soleil vont dans le même sens, les marées sont plus importantes (vives-eaux).*

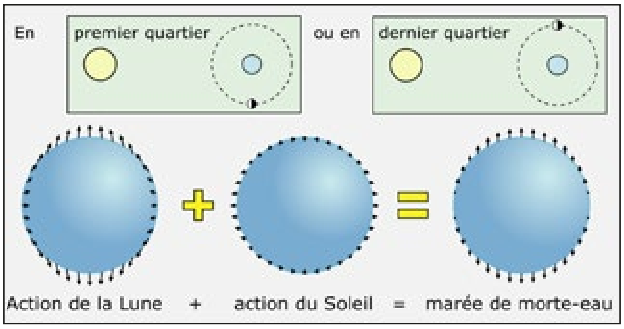


Fig.10b. *En premier ou en dernier quartier, les forces de marée dues au Soleil amoindrissent les marées dues à la Lune, les marées sont de plus faible amplitude (mortes-eaux).*

Les plus grandes marées

La distance de la Lune

La Lune à l'apogée (au plus loin de la Terre) est à un peu plus de 406 000 km ; au périgée (au plus près de la Terre), elle est à environ 356 000 km. De l'apogée au périgée, les forces de marées augmentent de près de 50 %, ce qui est loin d'être négligeable. Si vous voulez trouver des marées importantes, il faut les chercher aux alentours du périgée de la Lune. De plus, comme la distance de la Lune au périgée n'est pas constante (l'orbite de la Lune se déforme), c'est encore mieux si le périgée est minimal.

Les marées d'équinoxes

On lit parfois que « lors des équinoxes, le Soleil exerce une attraction plus forte sur la Terre que le reste de l'année » [2]. Encore une idée fausse, l'attraction du Soleil est maximale lorsqu'il est au plus près de la Terre, début janvier. Et pourtant, les marées d'équinoxes sont connues pour être les plus importantes de l'année.

Aux équinoxes, le Soleil est dans le plan de l'équateur terrestre, donc la nouvelle Lune ou la pleine Lune aussi. Un schéma permet de comprendre l'origine de l'importance des marées d'équinoxe, en particulier à l'équateur (figure 11a) où le bourrelet est le plus important. C'est moins évident à nos latitudes.

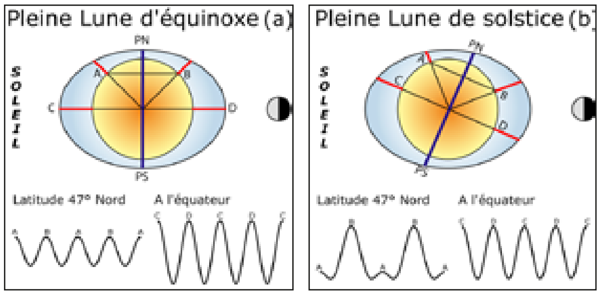


Fig.11. *Marées de pleine Lune aux équinoxes et aux solstices. Les courbes en dessous indiquent la hauteur d'eau au cours de la rotation de la Terre dans ce modèle simplifié.*

Aux solstices (figure 11b), les marées sont moins importantes à l'équateur. À une latitude de 47° N, on remarque une forte différence entre les deux marées.

Les grandes marées 2021

Trois conditions sont donc nécessaires pour obtenir de très grandes marées :

- nouvelle Lune ou pleine Lune ;
- périgée si possible minimal ;
- équinoxe.

Et c'est encore mieux si la Lune est dans le plan de l'écliptique (proche d'un nœud lunaire).

Si nous cherchons aux alentours de l'équinoxe du 20 mars 2021 :

- nouvelle Lune les 13 mars et 12 avril, pleine Lune le 28 mars ;
- périgée le 2 et le 30 mars.

La période la plus favorable est autour du 28 au 30 mars : le coefficient de marée le plus important de cette période est de 112 le 30 mars.

En septembre-octobre, nous obtenons une situation assez proche début octobre avec un périgée le 8/10 et une nouvelle Lune le 6/10. Le plus fort coefficient sera de 108 le 8/10. Il est moins important qu'en mars mais nous sommes un peu plus loin de l'équinoxe et le périgée est plus éloigné (363 400 km le 8/10 contre 360 300 km le 30/03).

Le coefficient de marée peut varier de 20 à 120. Il est proportionnel au marnage (la variation de hauteur d'eau entre basse mer et pleine mer). Il vaut 100 pour une marée de vive-eau équinoxiale moyenne. Vous trouverez page 19 un graphique montrant les coefficients de marée en 2021.

Les défauts de la théorie statique

Les explications précédentes permettent de comprendre l'origine des marées, mais elles sont loin de refléter la réalité. Nous avons en effet supposé (comme Newton) d'une part qu'un océan recouvrait l'ensemble de la Terre et d'autre part que les forces déformaient instantanément cet océan, ce qui est loin d'être le cas.

Dans la théorie statique, les pleines mers devraient avoir lieu au moment où la Lune passe dans le plan du méridien, plein sud (aux latitudes de l'Europe), ou à son opposé sous l'horizon plein nord. En réalité, ce n'est pas le cas. Il faut un certain temps pour que l'onde de marée se forme et se propage. Ainsi, à La Rochelle, la marée haute arrive un peu plus de 3 h après le passage de la Lune au méridien. À Roscoff, c'est 5 h, à St-Malo, 6 h, à Cherbourg, près de 8 h, Le Havre, 10 h... L'onde de marée doit remonter la Manche. C'est ce qu'on appelle l'établissement du port (carte page 24).

De la même manière, les marées de vives-eaux n'ont pas lieu le jour de la pleine Lune ou de la nouvelle Lune, mais environ 2 jours plus tard.

Dans la théorie statique, les variations de hauteur d'eau devraient être de l'ordre de 50 cm. Or on observe des marnages de plusieurs mètres sur la côte atlantique, jusqu'à 15 m dans la baie du Mont-Saint-Michel ou même 16 m au Canada, dans la baie de Fundy. Il se trouve que le bassin atlantique a une résonance d'environ 12 h qui amplifie le balancement périodique des masses d'eau. De plus, la forme des côtes et le relief sous marin peuvent amplifier la marée, par exemple lorsque l'onde de marée remonte la Manche et la baie du Mont-St-Michel.

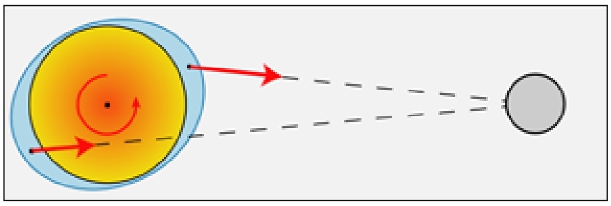
Nous sommes habitués sur les côtes atlantiques à 2 marées par jour à peu près équivalentes, espacées de 12 h 25 min en moyenne. Mais, en fonction de la résonance du bassin, on trouve certaines régions du monde où l'on n'observe qu'une seule marée par jour (sur certaines côtes du Pacifique), d'autres régions avec une forte inégalité diurne entre les deux marées du jour...

La théorie statique ne permet pas de faire des prévisions correctes. On utilise maintenant des modèles où l'on décompose le phénomène en ondes de différentes périodes : ondes semi-diurne M2 (M comme moon) de période 12 h 25 min ou S2 (S comme sun) de période 12 h, ondes diurnes, bimensuelles, mensuelles, semestrielles... On en utilise plus d'une centaine dont les coefficients varient suivant les ports. La marée observée est le résultat de la superposition de toutes ces ondes.

Autres effets des marées

Pour terminer, voici quelques autres effets des marées, abordés très superficiellement.

• Les marées océaniques ralentissent la rotation de la Terre et la durée du jour augmente de près de deux millisecondes par siècle. Le phénomène peut s'expliquer de deux manières : par la perte d'énergie due aux frottements de l'eau sur les fonds océaniques ou par l'attraction de la Lune sur les bourrelets dues aux marées qui ont un certain retard.



• La Terre ralentissant, la Lune s'éloigne de la Terre d'environ 4 cm par an, par conservation du moment cinétique du système Terre-Lune.

• Les effets de marée sont davantage visibles sur les océans car l'eau se déplace facilement. Mais la Lune attire autant les roches que l'eau et il existe également des marées terrestres qui font monter et descendre la croûte terrestre de quelques décimètres deux fois par jour.

• Il existe également des marées atmosphériques d'amplitude très faible en termes de forces de marée, mais amplifiées par les « marées thermiques » (chauffage de l'atmosphère par le Soleil côté jour).

• La Terre exerce également des effets de marée sur la Lune (20 fois plus importants que ceux de la Lune sur la Terre). Ainsi, la rotation de la Lune sur elle-même a ralenti jusqu'à être bloquée le long de l'axe Terre-Lune. La Lune montre ainsi toujours la même face à la Terre. On parle de rotation synchrone. De la même manière, les satellites galiléens de Jupiter montrent toujours la même face à la planète géante.

• Les effets de marée sont présents dans tout l'Univers : rotation synchrone de satellites, limite de Roche (la comète Shoemaker-Levy a été fragmentée lorsqu'elle est passée près de Jupiter en 1992), effet de marée entre deux étoiles, entre deux galaxies...

■

Pour en savoir plus
Tout savoir sur les marées Éd Ouest France (Odile Guérin)
La Lune à portée de main Éd Belin pour la science (Pierre Causeret, Jean-Luc Fouquet, Liliane Sarrazin)
La marée océanique côtière. Institut océanographique (Bernard Simon)
[1] sur https://www.cnews.fr/racines/2015-01-12/pourquoi-y-t-il-des-marees-hautes-et-des-marees-basses-697737
[2] https://www.oceanclock.com/fr/blog/5-pourquoi-les-marees-dequinoxes-sont-elles-plus-fortes-